



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΠΡΟΛΗΨΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΩΝ»

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης
της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα**

Μιλτιάδης Αθανασίου

Περιβαλλοντολόγος

M.Sc. Πρόληψη & Διαχείριση Φυσικών Καταστροφών

**ΑΘΗΝΑ
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2015**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης
της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα**

Μιλτιάδης Αθανασίου
Α.Μ.: 127

Περιβαλλοντολόγος
M.Sc. Πρόληψη & Διαχείριση Φυσικών Καταστροφών

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ευθύμιος Λέκκας Καθηγητής (επιβλέπων)
Νίκη Ευελπίδου Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Γαβριήλ Ξανθόπουλος Αναπληρωτής Ερευνητής

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ευθύμιος Λέκκας Καθηγητής
Νίκη Ευελπίδου Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Γαβριήλ Ξανθόπουλος Αναπληρωτής Ερευνητής
Δημήτριος Παπανικολάου Καθηγητής
Μαργαρίτα Αριανούτσου - Φαραγγιτάκη Καθηγήτρια
Κωνσταντίνος Καλαμποκίδης Καθηγητής
Παύλος Κωνσταντινίδης Τακτικός Ερευνητής

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ: 21/12/2015

© Μιλτιάδης Αθανασίου

© Ε.Κ.Π.Α.

Τίτλος Διδακτορικής Διατριβής: **Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα.**

ISBN

Ἡ ἔγκριση τῆς παρούσης διδακτορικῆς διατριβῆς ἀπὸ τὸ τμήμα Γεωλογίας καὶ Γεωπεριβάλλοντος τῆς Σχολῆς Θετικῶν Επιστημῶν τοῦ Ἐθνικοῦ καὶ Καποδιστριακοῦ Πανεπιστημίου Ἀθηνῶν δὲν υποδηλώνει ἀποδοχὴ τῶν γνωμῶν τοῦ συγγραφέα (Ν. 5343/1932, ἀρθρο 202, παρ. 2).

Στην Αριστεά, τον Χρήστο και την Ελένη

και

στους δασκάλους μου

Πρόλογος

Θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή Δρ. Ευθύμιο Λέκκα, την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Δρ. Νίκη Ευελπίδου και τον Αναπληρωτή Ερευνητή στο Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων του ΕΛΓΟ «ΔΗΜΗΤΡΑ» Δρ. Γαβριήλ Ξανθόπουλο, για την ανάθεση και την επίβλεψη της διδακτορικής μου διατριβής.

Ο Καθηγητής Ευθύμιος Λέκκας και η Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Νίκη Ευελπίδου έδειξαν την εμπιστοσύνη τους στο πρόσωπό μου και με στήριξαν με ειλικρινές ενδιαφέρον, κατά τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Ο Δρ. Γαβριήλ Ξανθόπουλος έχει διαθέσει άφθονο χρόνο, από την εποχή της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου διατριβής στο ίδιο επιστημονικό πεδίο και μέχρι σήμερα. Οι συμβουλές του ήταν εξ' αρχής καθοριστικές, για την επιστημονική προσέγγιση του αντικειμένου της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών και την πορεία της ερευνητικής μου προσπάθειας αλλά και για την ολοκλήρωση της προσωπικότητάς μου ως ερευνητή.

Ευχαριστώ, επίσης, τους Καθηγητές του ΕΚΠΑ Μαργαρίτα Αριανούτσου – Φαραγγιτάκη και Δημήτριο Παπανικολάου και του Πανεπιστημίου Αιγαίου Κωνσταντίνο Καλαμποκίδη, καθώς και τον Τακτικό Ερευνητή στο Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών του ΕΛΓΟ «ΔΗΜΗΤΡΑ» Δρ. Παύλο Κωνσταντινίδη για τη τιμή που μου έκαναν, συμμετέχοντας στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Τμήμα των μετρήσεων που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια της διατριβής, δεν θα είχε ληφθεί αν δεν είχε προηγηθεί η εμπλοκή μου στην καταστολή δασικών πυρκαγιών, με την ιδιότητα του πιστοποιημένου εθελοντή Πολιτικής Προστασίας. Γι' αυτό, ευχαριστώ τον νυν Υποστράτηγο ε.α. του Πυροσβεστικού Σώματος κ. Δημήτριο Τρόντζα, η συμβολή του οποίου ήταν καθοριστική πριν από δεκαέξι χρόνια, κατά τα πρώτα μου βήματα σε επιχειρήσεις αντιμετώπισης μεγάλων δασικών πυρκαγιών.

Θέλω να ευχαριστήσω τις αγαπητές Βιβή Τσιούμα, Αλεξία Γραμπά, Βίβιαν Θεοδοσίου και Χριστίνα Λέκκα στο Τμήμα Γεωλογίας του ΕΚΠΑ, για την άμεση και ουσιαστική υποστήριξή τους, όποτε τη χρειάστηκα.

Για την υποστήριξή τους και τη συνεργασία, ευχαριστώ επίσης, τον κ. Νικόλαο Μπόγδο, υποψήφιο διδάκτορα πληροφορικής στο ΕΚΠΑ, τους δασολόγους Δρ. Μιχαήλ Ξανθάκη, κ. Βασιλική Βαρελά, κ. Γεώργιο Ευτυχίδη και κ. Τριαντάφυλλο Μπουχούνα και τους Επιπυραγούς του Πυροσβεστικού Σώματος κ. Βασίλειο Μαρτζάκλη και κ. Ιωάννη Κουσαρίδα.

Τέλος, στον οικογενειακό μου κύκλο θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη σύζυγό μου Αριστέα και την αδερφή μου Ευδοκία για όλη την υποστήριξη και τη βοήθεια που μου προσέφεραν.

Η διδακτορική μου διατριβή χρηματοδοτήθηκε σε ένα μέρος της, από τη Διεθνή Ένωση για τις Δασικές Πυρκαγιές (International Association of Wildland Fire) διαμέσου της υποτροφίας για υποψήφιους διδάκτορες (Doctoral Student Scholarship Award) για το έτος 2014.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Περίληψη

Σκοπός της διατριβής ήταν η ανάπτυξη μεθόδων αξιόπιστης πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα, ώστε να υποστηριχθεί η λήψη αποφάσεων κατά τη διαχείρισή τους (την πρόληψη, τον προκατασταλτικό σχεδιασμό και την καταστολή) και να βελτιωθεί η ασφάλεια των δασοπροσβεστών.

Για την επίτευξη του σκοπού απαιτήθηκε η συλλογή μετρήσεων πραγματικής συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών στο πεδίο κατά τη διάρκεια της εξάπλωσής τους, που επέτρεψαν τον έλεγχο της αξιοπιστίας υφιστάμενων μοντέλων και συστημάτων πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών και τη διερεύνηση της δυνατότητας για τη δημιουργία εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης. Ακόμη, αξιολογήθηκε, με τη βοήθεια ερωτηματολογίων, η δυνατότητα εμπειρικής εκτίμησης της συμπεριφοράς πυρκαγιάς από επαγγελματίες και εθελοντές δασοπροσβεστές.

Τα αξιοποιήσιμα ευρήματα που προέκυψαν από την ανάλυση, χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία λογιστικού φύλλου εργασίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως Σύστημα Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (DSS) κατά τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών.

Ειδικότερα, από τις μετρήσεις πεδίου δημιουργήθηκε βάση δεδομένων με 196 περιπτώσεις συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, που τεκμηριώθηκαν από το έτος 2007 έως και το 2014. Οι μετρήσεις του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιών επιφανείας σε χαμηλά μακί (αείφυλλα πλατύφυλλα), υψηλά μακί, φρύγανα και χαμηλά χόρτα, που περιγράφηκαν από τα τέσσερα αντίστοιχα Ελληνικά Μοντέλα Καύσιμης Ύλης, συγκρίθηκαν με τις προβλέψεις του συστήματος πρόβλεψης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών BehavePlus της Δασικής Υπηρεσίας των ΗΠΑ. Προέκυψαν τέσσερις στατιστικά σημαντικές εξισώσεις, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσαρμογή των προβλέψεων του BehavePlus στις αναμενόμενες πραγματικές τιμές του ρυθμού εξάπλωσης για την Ελλάδα και ενσωματώθηκαν στο DSS, διευκολύνοντας την επιχειρησιακή αξιοποίησή τους.

Για τα υψηλά μακί, το BehavePlus προέβλεψε λίγο υψηλότερες τιμές από τις πραγματικές και η συμφωνία των προβλέψεων με τις μετρήσεις ήταν πολύ καλή οπότε η χρήση της εξίσωσης για αυτό το δασικό τύπο, δεν φάνηκε να είναι αναγκαία. Οι προβλέψεις του BehavePlus για τα χαμηλά χόρτα ήταν κατά 50% περίπου χαμηλότερες από τις πραγματικές και η στατιστικά σημαντική εξίσωση, που εξηγεί το 85% της διακύμανσης των τιμών του ρυθμού εξάπλωσης του δείγματος, πρέπει να εφαρμόζεται για την προσαρμογή των προβλέψεων στις αναμενόμενες πραγματικές τιμές του ρυθμού εξάπλωσης των πυρκαγιών, σε αυτά τα λεπτά καύσιμα. Οι εξισώσεις για τα χαμηλά μακί και την αστοιβίδα πρέπει να χρησιμοποιούνται, επίσης, για την

προσαρμογή των προβλέψεων του BehavePlus στις αναμενόμενες χαμηλότερες πραγματικές τιμές.

Οι προβλέψεις του μήκους φλόγας από το BehavePlus, για τα χαμηλά μακί, τα υψηλά μακί, τα φρύγανα και τα χαμηλά χόρτα, δεν ήταν αξιόπιστες. Το πλέον σημαντικό εύρημα της ανάλυσης των τιμών του μήκους φλόγας, ήταν ότι για την αστοιβίδα, το BehavePlus υποεκτίμησε συστηματικά και σημαντικά το μήκος φλόγας, υπολογίζοντας τιμές μικρότερες από 1,2 μέτρα, που είναι το όριο για άμεση προσβολή της φλόγας με χειρωνακτικά εργαλεία, ενώ οι πραγματικές ήταν μεγαλύτερες από 1,2 μέτρα. Το συμπέρασμα αυτό είναι χρήσιμο για την ασφάλεια δασοπροσβεστών που εργάζονται σ' αυτά τα πολύ εύφλεκτα καύσιμα όπου έχουν συμβεί πολλά δυστυχήματα στην Ελλάδα και πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη.

Επιπλέον, η ανάλυση οδήγησε στη δημιουργία εμπειρικής εξίσωσης πρόβλεψης του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιών σε χαμηλά μακί και επίπεδες περιοχές, με εκθετική μορφή, η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου την τιμή της έντασης του ανέμου. Η εξίσωση ενσωματώθηκε στο DSS μαζί με μία δεύτερη γραμμική εμπειρική εξίσωση για τον ίδιο δασικό τύπο η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένα εισόδου την ένταση του ανέμου, την περιεχόμενη υγρασία στα λεπτά νεκρά καύσιμα και την ποσοστιαία μορφολογική κλίση.

Ακόμη, δημιουργήθηκε και ενσωματώθηκε στο DSS εμπειρική εξίσωση πρόβλεψης του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιών σε χαμηλά χόρτα και επίπεδες περιοχές, εκθετικής μορφής, η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένο εισόδου την τιμή της έντασης του ανέμου.

Η καμένη έκταση και ο ρυθμός εξάπλωσης τμήματος της τεκμηριωμένης πυρκαγιάς της ΒΑ Αττικής του 2009, συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της χωρικής εξάπλωσής της που παρήχθησαν από τα συστήματα FARSITE, G-FMIS και FLogA. Διαπιστώθηκε αδυναμία του FARSITE να παράγει αποτελέσματα ικανοποιητικής ακρίβειας, παρόλο που για την περιγραφή των υψηλών, χαμηλών μακί, της αστοιβίδας και των χαμηλών χόρτων χρησιμοποιήθηκαν τα τέσσερα Ελληνικά Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.). Αντίθετα, με τη χρήση των ίδιων Μ.Κ.Υ., τα συστήματα G-FMIS και FLogA παρήγαγαν προσομοιώσεις αποδεκτής ακρίβειας η οποία βελτιώθηκε περαιτέρω, όταν στις τιμές της έντασης του γενικού ανέμου εφαρμόστηκαν συντελεστές προσαρμογής της έντασής του στο ύψος του μέσου της φλόγας της πυρκαγιάς επιφανείας, ανάλογα με τα εκάστοτε δασικά καύσιμα.

Επίσης, δοκιμάστηκε η εφαρμογή πρόβλεψης της έναρξης και εξάπλωσης πυρκαγιών κόμης (Crown Fire Initiation and Spread - CFIS) των Alexander et al. (2006). Από τη σύγκριση των στοιχείων πεδίου με τις προβλέψεις για δάση Χαλεπίου πεύκης με υπόροφο αειφύλλων

πλατυφύλλων, διαπιστώθηκαν σημαντικές αποκλίσεις τόσο ως προς τον τύπο της πυρκαγιάς κόμης (ενεργή, παθητική) όσο και ως προς τον ρυθμό εξάπλωσης. Οι μεθοδολογίες υπολογισμού της πυκνότητας της διαθέσιμης προς καύση βιομάζας του ανωρόφου, που αναπτύχθηκαν για τη Χαλέπιο πεύκη και την Κεφαλληνιακή Ελάτη για να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένο εισόδου στο CFIS, μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων σχετικά με στοχευμένους δασοκομικούς χειρισμούς για τη μείωση του κινδύνου της δασικής πυρκαγιάς. Στο DSS περιλαμβάνονται τρεις εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού της πυκνότητας της διαθέσιμης προς καύση βιομάζας του ανωρόφου της Χαλεπίου πεύκης, ανάλογα με τα διαθέσιμα δενδρομετρικά χαρακτηριστικά.

Ακόμη, δημιουργήθηκε κριτήριο πρόβλεψης της μετατροπής των παθητικών πυρκαγιών κόμης σε ενεργές πυρκαγιές κόμης, σε δάση Χαλεπίου πεύκης με υπόροφο υψηλών μακί. Υπολογίζει τον ελάχιστο ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς επιφανείας ώστε, για δεδομένη τιμή πυκνότητας της βιομάζας του ανωρόφου που είναι διαθέσιμη προς καύση, η παθητική πυρκαγιά κόμης να μετατραπεί σε ενεργή. Το μοντέλο ενσωματώθηκε στο DSS και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο πλαίσιο της διαχείρισης των δασικών καυσίμων για τη μείωση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Από την ανάλυση επίσης προέκυψε ότι ο ρυθμός εξάπλωσης των καθοδηγούμενων από τον άνεμο ενεργών πυρκαγιών κόμης σε δάση Χαλεπίου πεύκης με υπόροφο υψηλών μακί είναι διπλάσιος από το ρυθμό εξάπλωσης των πυρκαγιών επιφανείας στον υπόροφό τους. Η ισχύς της σχέσης είναι περιορισμένη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για την κατά προσέγγιση εκτίμηση της αναμενόμενης συμπεριφοράς ενεργών πυρκαγιών κόμης σε πευκοδάση.

Ακόμη, από την ανάλυση προέκυψε ότι ο παράγοντας που επηρεάζει καθοριστικά τη συμπεριφορά και την εξάπλωση των κυριαρχούμενων από ισχυρή κατακόρυφη επαγωγική στήλη πυρκαγιών κόμης, είναι οι συνθήκες που δημιουργούνται από την ανάπτυξη της επαγωγικής στήλης και όχι ο εκάστοτε δασικός τύπος στον οποίον εξαπλώνονται. Οι αποστάσεις μετάδοσης της φωτιάς με καύτρες σε δάση Χαλεπίου πεύκης, για τις πυρκαγιές αυτής της κατηγορίας, ήταν πολύ μεγαλύτερες από τις αποστάσεις που καταγράφηκαν σε καθοδηγούμενες από τον άνεμο ενεργές πυρκαγιές κόμης στον ίδιο δασικό τύπο. Ο αριθμός των καυτρών που καταγράφηκε στις περιπτώσεις ανάπτυξης ισχυρής κατακόρυφης επαγωγικής στήλης, ήταν επίσης πολύ μεγαλύτερος απ' ό,τι στην κεφαλή των ενεργών, καθοδηγούμενων από τον άνεμο, πυρκαγιών κόμης.

Η τιμή σχετικής υγρασίας του αέρα 40,3 %, ήταν η ανώτατη στην οποία καταγράφηκε έναυση καύτρας σε φρύγανα, στα οποία διαπιστώθηκε μεγαλύτερη ευκολία έναυσης από καύτρες σε σχέση με τη μακία βλάστηση και τα χόρτα. Για τιμές μικρότερες του 25% καταγράφηκαν

αρκετές έως και δεκάδες καύτρες ενώ για τιμές μικρότερες του 17% το φαινόμενο ήταν έντονο και έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην εξάπλωση της πυρκαγιάς συμβάλλοντας στην εμφάνιση ακραίας και, κάποιες φορές, εκρηκτικής συμπεριφοράς της φωτιάς.

Όσον αφορά το ερωτηματολόγιο, οι συμμετέχοντες όλων των επιπέδων εμπειρίας, που εκτίμησαν τη συμπεριφορά της φωτιάς σε 15 περιπτώσεις με βάση τα βοηθητικά στοιχεία που τους δίνονταν, υποεκτίμησαν σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς στα φρύγανα και τα χόρτα που είναι λεπτά καύσιμα και δεν συγχωρούν λάθη. Διαπιστώθηκε η αδυναμία των συμμετεχόντων όλων των επιπέδων εμπειρίας, να διακρίνουν την ειδοποιό διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς στην πλευρά της, από τη συμπεριφορά στην κεφαλή της. Οι συμμετέχοντες δεν μπόρεσαν, επίσης, να επισημάνουν τον κίνδυνο εκδήλωσης εκρηκτικής συμπεριφοράς της φωτιάς σε μια περίπτωση κλειστού φαραγγιού για την οποία ερωτήθηκαν. Οι μεγάλες αποκλίσεις των εμπειρικών εκτιμήσεων από την πραγματική συμπεριφορά των πυρκαγιών, έδειξαν ότι είναι αναγκαία η δημιουργία κατάλληλα προσαρμοσμένων εκπαιδευτικών προγραμμάτων που να δίνουν στο προσωπικό όλων εμπλεκόμενων φορέων, τη δυνατότητα κατανόησης των βασικών μηχανισμών μέσω των οποίων διαδίδονται οι δασικές πυρκαγιές.

Τα κύρια αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία πίνακα στον οποίον προτείνονται οι κατάλληλες μέθοδοι πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και επισημαίνονται τα ερωτήματα ή/και οι περιορισμοί που συνοδεύουν την εφαρμογή τους. Σε πολλές περιπτώσεις, ο πίνακας παραπέμπει στο DSS που δημιουργήθηκε. Σε δεύτερο πίνακα, παρουσιάζεται η δυνητική χρήση μεθόδων του πρώτου πίνακα κατά τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών (από το στάδιο της πρόληψης έως την αποκατάσταση) και για εκπαιδευτικούς σκοπούς, από το Πυροσβεστικό Σώμα, τη Δασική Υπηρεσία, τις υπηρεσίες Πολιτικής Προστασίας και τους πιστοποιημένους εθελοντές.

Λέξεις Κλειδιά: Πρόβλεψη συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, δασικές πυρκαγιές επιφανείας, δασικές πυρκαγιές κόμης, αείφυλλα πλατύφυλλα, μακί, φρύγανα, χορτολίβαδα, Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.), Χαλέπιος πεύκη, πυκνότητα εναέριας καύσιμης ύλης δασοσυστάδας, μετάδοση δασικών πυρκαγιών με καύτρες, Σύστημα Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (DSS), Ελλάδα